



수거 형태에 따른 음식물류 폐기물의 혐기성 분해 특성

최재민, 김정광, 이채영[†]

수원대학교 토목공학과 · 하천환경기술연구소
(2015년 3월 10일 접수, 2015년 3월 23일 수정, 2015년 3월 24일 채택)

Biodegradation Characteristics of food waste on various collection systems

Jae-Min Choi, Jung-Kwang Kim, Chae-Young Lee[†]
Department of Civil Engineering, Institute of River Environmental Technology,
The University of Suwon

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the biodegradation characteristics of food waste on various collection systems using anaerobic batch test. The ultimate methane production from food waste in standard plastic garbage bags (sample A) was 285.6 mL CH₄/g volatile solids (VS) which is the lowest, and reaction constant was 0.215 d⁻¹. The ultimate methane production from food waste in waste vessel based on RFID (sample D) was 493.4 mL CH₄/g VS which is the highest, and reaction constant was 0.162 d⁻¹. The determinants of rate limiting step on all samples showed positive numbers, and the methane production step was found a rate limiting step

Keywords : Food waste, collection system, anaerobic digestion, reaction constant, 1st order, rate limiting step

초 록

본 연구는 회분식 실험을 통해 수거 형태에 따른 음식물류 폐기물의 혐기성 분해 특성을 평가하였다. 일반 종량제 봉투 내 음식물류 폐기물 (sample A)의 경우 최종 메탄 수율은 285.6 mL CH₄/g volatile solids (VS)로 가장 낮게 나타났으며 반응 속도는 0.215 d⁻¹로 가장 높게 나타났다. RFID 기반의 폐기물

[†] Corresponding author : chaeyoung@suwon.ac.kr

용기 내 음식물류 폐기물 (sample C)의 최종 메탄 수율 493.4 mL CH₄/g VS로 가장 높게 나타났으며 반응 속도는 0.162 d⁻¹로 가장 낮게 나타났다. 모든 시료의 율속 단계 결정 계수는 양수로 나타나 메탄 생성 단계가 율속 단계인 것으로 나타났다.

주제어 : 음식물류 폐기물, 수거 체계, 혐기성 소화, 반응 속도, 1차식, 율속 단계

1. 서론

국내 생활폐기물 중 음식물류 폐기물의 비율은 2003년을 기준으로 점차 증가하는 추세로 나타나고 있다. 2012년 기준으로 음식물류 폐기물의 발생량은 1일 14 천 톤으로 생활 폐기물 중 27%를 차지하고 있다¹⁾. 음식물류 폐기물의 증가로 인해 주변 주거 환경에 대한 악취, 위생 및 미관 등의 잠재적인 문제점을 지니고 있다²⁾. 또한 음식물류 폐기물의 수거 차량으로 인한 CO₂ 발생, 주변 소음, 수거 인원의 인건비 문제를 지니고 있다²⁾. 이러한 문제점을 해결하고 주민의 편의성 향상을 위해 최근 음식물류 폐기물의 수거 체계에 대한 변화가 시도되고 있다.

폐기물 자동집하시설은 지하관로를 통해 폐기물을 수거하는 방식으로 기존의 수거방식과 비교하여 수거 차량의 운행 및 폐기물의 야적을 최소화할 수 있어 도시미관상 장점을 지니고 있다. 그러나 초기 건설비용과 유지관리 비용이 기존 차량 수거방식에 비해 많이 소요되어 비용 확보에 어려움이 있다³⁾. 2011년 일부 도시를 대상으로 시범 사업이 진행되고 있는 자동 계량장비 방식 (Radio Frequency IDentification, RFID)은 기존의 수거 체계인 중량제 봉투와 동일한 방식이나 표준화된 음식물류 폐기물의 통합관리가 가능하며 미관상의 문제를 일부 해결할 수 있는 장점을 지니고 있다⁴⁻⁵⁾. 세대별 음식물류 폐기물의 발생량은 감소하는 경향으로 나타났으나 기존 수거 체계에 비해 위생 및 수거 차량에 의한 문제 등은 해결하지 못하는 것으로 나타났다⁵⁾.

음식물류 폐기물의 수거 체계는 변화하고 있으나 이를 처리하기 위한 방안은 확립되어 있지 않

다. 국내에서 발생하는 음식물류 폐기물은 소각, 재활용 및 직매립 등에 의해 처리되었다. 그러나 2013년부터 음식물류 폐수의 해양투기 금지, 그리고 재활용에 대한 기준 강화 등으로 인해 수거된 음식물류 폐기물의 처리에 대한 방안을 모색하고 있다²⁾.

음식물류 폐기물은 유기성 물질을 다량으로 함유하고 있어 에너지원으로써 활용이 가능하며 적절한 기술 적용 시 기존의 화석 연료의 소비를 감소시킬 수 있고 이로 인해 환경 보전에도 크게 기여할 수 있다⁶⁾. 음식물류 폐기물을 에너지원으로써 활용하는 적절한 기술 중 혐기성 소화의 경우 효율적인 감량이 가능하며 추가적으로 발생하는 메탄 가스를 활용할 수 있어 활발한 연구가 진행되고 있다⁷⁾. 그러나 음식물류 폐기물의 수거 형태에 따른 혐기성 소화 특성에 관한 연구는 부족한 실정이다. Lee et al. (2011)은 주방용 오물 분쇄기가 설치된 공동 주택에서 발생하는 음식물류 폐기물을 이용하였다⁷⁾. Choi and Lee (2014)는 가정용 오물분쇄기로 처리된 음식물류 폐기물을 이용하여 연구를 수행하였다⁶⁾. 일부 연구자들에 의해 오물 분쇄기로 처리된 음식물류 폐기물에 대한 연구는 진행되었으나 자동집하시설과 RFID 기반의 수거 체계에서 발생하는 음식물류 폐기물에 대한 혐기성 소화의 연구는 미진한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 회분식 혐기성 메탄 잠재량 평가 (Biochemical Methane Potential, BMP)를 이용하여 음식물류 폐기물의 수거 형태에 따른 메탄잠재량을 평가하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 회분식 혐기성 메탄 잠재량 실험

음식물류 폐기물의 혐기성 메탄 잠재량을 평가하기 위해 총 체적 300mL(유효 체적: 240mL)의 혈청병 (Wheaton, USA)을 사용하여 BMP 실험을 수행하였다. 기질은 일반 가정용 종량제 봉투(A), 자동집하시설(B), RFID 기반의 음식물류 폐기물 용기(C) 및 일반 업소용 종량제 봉투(D)에서 채취한 시료를 이용하였다. 채취한 시료는 가정용 분쇄기를 이용하여 1mm 이하로 분쇄하였으며 실험에 이용되기 전까지 4℃이하에서 냉장 보관하였다. 식중 미생물은 S시에 위치한 하수 처리장의 소화조 유출수를 4mm 체를 이용하여 거른 후 이용하였다. 소화조 유출수의 휘발성 고형물 (Volatile Solids, VS) 및 알칼리도는 각각 19.1 g/L, 2,300 mg/L as CaCO₃로 나타났다.

혈청병에 식중 미생물을 유효체적의 10%를 채운 후 기질 농도에 대한 저해 효과를 방지하기 위해 2 g VS (Volatile Solids)/L로 주입하였으며 나머지는 초순수로 채웠다⁸⁾. 식중 미생물, 기질 및 초순수로 채워진 혈청병은 3M HCl과 5M NaOH를 이용하여 pH 7.2±0.1로 고정하였으며 유기산 생성에 따른 pH 감소를 방지하기 위해 5 g / L의 NaHCO₃를 첨가하였다. pH가 고정된 혈청병은 35℃, 120rpm으로 고정된 진탕배양기 (VS-8480, Vision, Korea)에서 배양하였다.

2.2 분석 방법

가스 발생량은 유리주사기를 이용하여 측정하였으며 메탄가스의 함량은 혈청병의 기상부분에서 gas-tight syringe를 이용하여 0.2mL의 시료를 채취한 후 열전도성 검출기 (Thermal Conductivity Detector, TCD)가 장착된 가스 크로마토그래피(Gas Chromatography, Gow-Mac series 580, USA)를 통해 측정하였다. Column은 Porapak Q(80/100 mesh)를 충전제로 사용한 6ft × 2 mm(i.d) stainless steel column을 이용하였다. Column, injector 및 detector의 온도는

각각 50, 80 및 90℃로 고정하였으며 헬륨(30mL/min)을 운반 기체로 이용하였다.

소화슬러지의 VS와 알칼리도, 기질의 총 고형물 (Total Solids, TS), VS 및 화학적 산소 요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD)는 Standard Methods에 준해 실험을 수행하였다⁹⁾.

2.3 해석 방법

혈청병의 가스 발생량은 기질을 주입하지 않고 식중 미생물만을 주입한 대조군의 가스 발생량을 배제하여 산정하였다. 산정된 메탄가스 발생량은 식 (1)을 이용하여 0℃, 1기압의 표준상태로 전환하여 단위 g VS당 발생하는 메탄가스 발생량을 보정하였다.

$$V_{CH_4}(STP L/g VS) = V_{CH_4}(at 35^\circ C) \times \frac{273}{(273 + 35)} \times \frac{(760 - 42.2)}{760} \quad (1)$$

여기서, 42.2는 35℃에서의 수증기압(mmHg)

보정된 값들은 식 (2)에 제시된 1차 식을 이용하여 메탄 수율, 초기 순응 시간 및 최대 메탄 발생 속도를 평가하였다¹⁰⁾.

$$B = B_0 [1 - e^{-k(t)}] \quad (2)$$

여기서, B = 누적 메탄 수율(mL CH₄/g VS)

B₀ = 최종 메탄 수율(mL CH₄/g VS)

k = 반응 속도 상수(d⁻¹)

도출된 동역학적 상수를 이용하여 혐기성 소화 단계 중 율속 단계(rate limiting step)를 평가하기 위해 식 (3)을 이용하였다¹¹⁾.

$$DR: \ln\left(\frac{k_1}{k_2}\right) = \ln\left(\frac{k}{k_2}\right)\left(1 - \frac{k_1}{k_2}\right) \quad (3)$$

여기서, DR (Determinant of Rate limiting step) = 율속 단계 결정 계수

- k = 전체 반응 속도 (d^{-1})
- k_1 = 산 생성 반응 속도 (d^{-1})
- k_2 = 메탄 생성 반응 속도 상수(d^{-1})

3. 결과 및 고찰

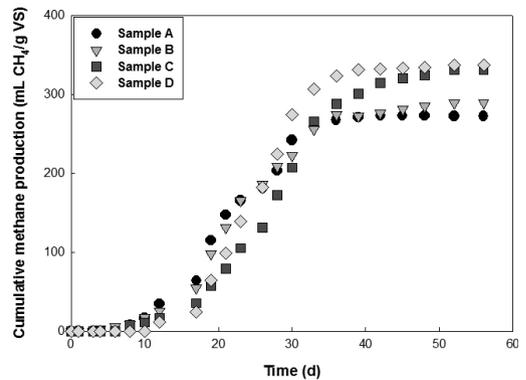
3.1 음식물류 폐기물 특성

[Table 1]에는 시료 A, B, C 및 D의 특성을 제시하였다. 일반 가정용 종량제 봉투인 시료 A의 경우 수분이 78.2%로 가장 낮게 나타났으며 TS 및 VS는 각각 216.3과 183.6 g/L로 가장 높게 나타났다. 자동집하시설에서 채취한 시료 B의 경우 시료 A와 유사한 경향을 나타내었다. 그에 반해 RFID 기반의 음식물류 폐기물 용기 (시료 C)와 일반 업소용 종량제 봉투 (시료 D)에서 채취한 시료들의 경우에는 수분이 각각 82.6 및 84.7%로 시료 A와 B에 비해 다소 높게 나타났다. 또한 VS/TS의 비의 경우 시료 A는 0.85, 시료 B는 0.83으로 나타났으며 시료 C는 0.92, 시료 D는 0.91로 높게 나타났다. 시료 A와 B의 경우 배출원에서 일정 시간 동안 방치되며 일부 수분을 배제한 후 배출되고, 시료 C와 D의 경우 배출원에서 발생된 후 즉시 배출됨에 따라 발생한 차이 인 것으로 판단된다. 또한 시료 C 및 D의 VS/TS의 비가 다른 두 시료에 비해 높게 나타난 것으로 보아 유기물의 함량이 높은 것으로 판단된다.

3.2 수거 형태에 따른 음식물류 폐기물의 혐기성 분해 특성

[Fig 1]에는 수거 형태에 다른 음식물류 폐기물의 혐기성 분해 특성을 제시하였으며 [Table 2]에는 1차 식을 이용하여 도출된 동역학적 상수를 정리하였다. 시료 A와 B의 경우 각각 3 및 4일부터 메탄이 발생되기 시작하였으며 시료 C는 8일, 시료 D는 12일부터 발생되기 시작하였다. 최종 메탄 수율은 네 가지 중 시료 D가 409.6 mL CH₄/g VS로 가장 높게 나타났다.

시료 A의 최종 메탄 수율은 285.6 mL CH₄/g VS로 가장 낮게 나타났다. 그러나 반응 속도 상수인 k 값은 시료 A가 0.215 d^{-1} 로 가장 높으며 시료 D의 경우 0.157 d^{-1} 로 가장 낮게 나타났다. 이와 같은 결과는 시료 A와 B의 경우 배출원에서 일정 시간 방치됨에 따라 일부 분해가 진행되어 반응 속도가 빠르게 나타난 것으로 판단된다. 포도당을 기질로 이용할 경우 k 값은 0.266 d^{-1} 로 나타났으며 음식물류 폐기물의 경우 0.191 - 0.236 d^{-1} 로



[Fig 1] Cumulative methane production of food waste from various collection systems

[Table 1] Characteristics of food waste from various collection systems

Item	Sample			
	A	B	C	D
Moisture (%)	78,2	79,1	82,6	84,7
TS (g/L)	216,3	213,8	179,2	162,4
VS (g/L)	183,6	178,2	164,3	147,2
COD (g/L)	243,2	256,7	204,8	184,2
VS/TS	0,85	0,83	0,92	0,91

[Table 2] Summary of kinetic coefficients of food waste

	Sample			
	A	B	C	D
B0 (mL CH ₄ /g VS)	285.6	303.8	493.4	409.6
k (d ⁻¹)	0.215	0.203	0.162	0.157
R ²	0.9949	0.9955	0.9906	0.9841

나타나 본 연구와 유사한 결과를 나타내었다^{8, 11)}.

[Table 3]에는 DR과 메탄 생성 반응 속도에 대한 산 생성 반응 속도의 비를 나타내었다. 메탄 생성의 반응 속도는 선행 연구의 결과를 인용하였다¹¹⁾. 율속 단계 결정 계수인 DR이 음수일 경우 산 생성의 반응이 메탄 생성에 비해 느리게 진행되어 산 생성 단계가 율속 단계로 작용한다. 반대로 양수일 경우 메탄 생성의 반응이 느리게 되어 메탄 생성 단계가 율속 단계로 진행된다¹¹⁻¹²⁾. 본 연구 결과에 따르면 DR은 모두 양수로 나타나 메탄 생성 단계가 율속 단계로 진행되었다. 그 중 시료 A의 DR이 1.05로 가장 크게 나타났으며 k_1/k_2 는 2.87로 나타나 산 생성 반응이 메탄 생성 반응에 비해 2.87배 빠르게 진행된 것으로 나타났다. 시료 D의 경우 DR은 0.26이며, k_1/k_2 는 1.30으로 산 생성 반응이 메탄 생성 반응에 비해 1.30배 빠르게 진행된 것으로 판단된다. 시료 A와 B의 k_1/k_2 는 시료 C와 D에 비해 1.99배 높게 나타나 산 생성 반응 속도가 1.99배 빠른 것으로 판단된다. 전체 반응 속도 k 값과 메탄 발생 시점을 고려할 경우 시료 A와 B는 배출원에서 일정 시간 방치됨에 따라 분해가 이루어졌으며 이로 인해 산 생성 반응속도가 빠르게 진행되었고 전체 반응 속도가 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다.

음식물류 폐기물의 혐기성 소화 시 DR이 모두

양수로 나타나 메탄 생성 단계가 율속 단계로 작용하는 것으로 판단되나 수거 형태에 따라 반응 속도의 차이는 발생하였다. 일반 종량제 봉투와 자동집하시설에 설치된 집하장의 음식물류 폐기물의 경우에는 RFID 기반의 음식물류 폐기물 용기와 일반 업소용 종량제 봉투의 것보다 산 생성 반응 속도가 상대적으로 높게 나타나 혐기성 소화 시 중간 부산물인 휘발성 지방산의 축적이 발생할 수 있으며 이에 대한 전처리 또는 혐기성 소화조의 구성 등에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 수거 형태에 따른 음식물류 폐기물의 혐기성 분해 특성을 파악하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 일반 종량제 봉투 (시료 A)와 자동집하시설 (시료 B)의 음식물류 폐기물은 RFID 기반의 음식물류 폐기물 용기 (시료 C) 및 일반 업소용 종량제 봉투 (시료 D)의 것에 비해 수분은 낮고 고형물의 함량은 높게 나타났다.
2. 회분식 혐기성 메탄 잠재량 평가 결과, 시료 C와 D의 최종 메탄 수율이 각각 493.4 및 409.6 mL CH₄/g VS로 시료 A와 B에 비해 상대적으로

[Table 3] Kinetic variables and DR of the anaerobic degradation from food waste

	DR (=ln (k ₁ /k ₂))	k ₁ /k ₂
Sample A	1.05	2.87
Sample B	0.90	2.45
Sample C	0.32	1.38
Sample D	0.26	1.30

로 높게 나타났다. 반면에 시료 A와 B의 반응 속도는 각각 0.215 및 0.203 d⁻¹로 시료 C 및 D에 비해 높게 나타났다.

3. 음식물류 폐기물의 율속 단계 결정 계수 (DR) 수치에 따르면 모두 양수로 나타나 메탄 생성 단계가 율속 단계인 것으로 나타났다. 또한 시료 A와 B의 산 생성 반응 속도는 시료 C와 D에 비해 2.99배 높게 나타났다.
4. 본 연구 결과는 수거 형태에 따른 음식물류 폐기물의 혐기성 분해 특성을 파악하였으며 율속 단계 결정 계수 산정을 통해 단계별 반응 속도를 평가하였다. 이와 같은 결과는 향후 음식물류 폐기물의 혐기성 소화 시 전처리의 유무 결정과 혐기성 소화조의 구성 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 도시건축연구개발사업의 연구비 지원 (14AUDP-B083704-01)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ministry of Environment, “2013 Waste production and disposal in Korea”, pp. 174~324. (2014).
2. Shin, H. S., “Anaerobic digestion treatment of food waste”, Journal of The Korea Organic Resource Recycling Association, 8(2), pp. 7~13. (2000).
3. Incheon development institute, “A study on calculation of benefiter levy payments about automatic domestic waste collection facilities, pp. 12~42. (2013).
4. Gyenggi research institute, “Improvement plan of food waste discharge system”, pp. 24~52. (2011).
5. Busan development institute, “A pilot project analysis for the implementation of

food-waste-volume-based-fee system”, pp. 21~37. (2012).

6. Choi, J. M. and Lee, C. Y., “Anaerobic Hydrogen Fermentation of Food Waste from Garbage Disposer”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, 25(5), pp. 468-474. (2014).
7. Lee, C. Y. Lee, S. W. and Kim, S. H., “Anaerobic batch hydrogen fermentation of the food waste generated from apartment houses using the food waste disposal system”, Journal of Korea Society of Waste Management, 28(5), pp. 486-492. (2011).
8. Song, Y. C. and Bae, B. U. “Anaerobic degradation characteristics of organic waste component(I): Methane conversion, kinetics, particle size effect”, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 17(3), pp. 237-245. (1995).
9. APHA-AWWA-WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Waste water, 21th edition, American Public Health Association, Washington, DC., USA, (2005).
10. Shin, H. S. Lee, C. Y. and Kang, K. H., “Anaerobic biodegradability of leachates generated at landfill age”, Journal of The Korea Organic Resource Recycling Association, 8(1), pp. 90-96, (2000).
11. Song, Y. C., “High-rate methane fermentation of the organic solid waste”, Doctorate thesis, KAIST, Korea. (1995).
12. Ma, J., Frear, C., Wang, Z. W., Yu, L., Zhao, Q., Li, X. and Chen, S., “A simple methodology for rate-limiting step determination for anaerobic digestion of complex substrates and effect of microbial community ratio”, Bioresource Technology, 134, pp. 391-395. (2013). 